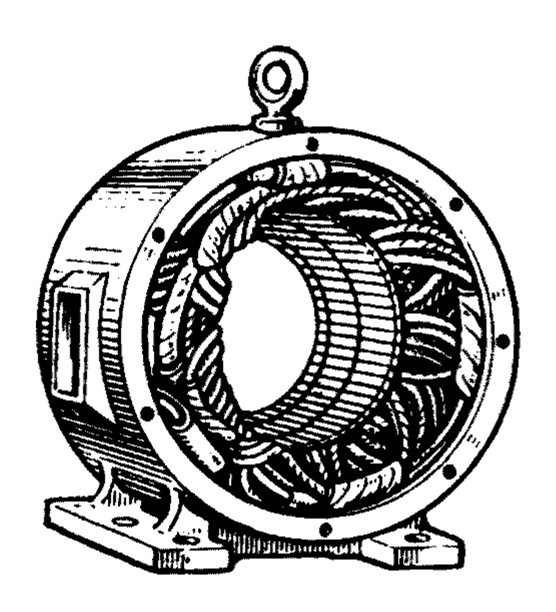
Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте



В настоящем документе представлена только часть указанного издания, касающаяся практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте.

В части сведений по обмоточным матералам, изоляционным, по данным номиналов обмоточных проводов и других стандартов следует обращаться к современным источникам (ГОСТ).

Кузнецов Б. В., Сацукевич М. Ф.

"Асинхронные электродвигатели и аппараты управления" 1982 г.

Rev. 04. 01 May 2021

Влияние качества ремонта электродвигателей на коэффициент мощности.

Качество ремонта асинхронных электродвигателей отражается на их технико – экономических показателях (коэффициенте мощности, КПД). Влияние ремонта на коэффициент мощности чаще всего связано с тем или иным изменением обмоточных данных (числа витков в фазе, схемы соединения, величины напряжения, приходящегося на виток, и пр.) и воздушных зазоров.

При перемотке обмотки особенно недопустимо уменьшение числа витков. Так, например, если число витков в фазе уменьшится на 10% при неизменном сечении фазы, то реактивная мощность и ток холостого хода электродвигателя увеличатся примерно на 25%. А это вызовет значительное снижение коэффициента мощности, особенно при фактических нагрузках, которые, как правило, намного меньше номинальной мощности электродвигателей. Одновременно снижается и коэффициент полезного действия. Увеличение потерь в стали составляет 21%.

Таким образом, при восстановительном ремонте обмоток асинхронных электродвигателей необходимо в каждом случае оценивать возможность применения того или иного варианта перемотки с учетом влияния его на технико – экономические показатели электродвигателя.

Магнитное сопротивление воздушного зазора асинхронного электродвигателя составляет 70 – 80% полного сопротивления его магнитной цепи. Поэтому можно считать, что на долю воздушного зазора приходится 70 – 80% реактивной – мощности холостого хода, потребляемой электродвигателем. В связи с этим необходимо строго следить за величиной воздушного зазора. Допустимая величина зазора ряда серий электродвигателей приведена в табл. 9, электродвигателей серий 4А и 4АН – в табл. 40 и 41.

Увеличение зазора на 1% влечет за собой увеличение тока холостого хода на 0,6% и снижение коэффициента мощности на 0,3%. Поэтому если зазор ремонтируемого электродвигателя на 20 – 25% больше нормального заводского, то перед ремонтом его обмоточные данные должны быть пересчитаны. Мощность такого электродвигателя после пересчета практически нельзя довести до паспортной, она будет завышенной. При увеличении воздушного зазора более чем на 25% экономически нецелесообразно осуществлять ремонт электродвигателя.

9. Величина зазора между статором и ротором асинхронных электродвигателей.

n, *об/мин.*	Зазор, *мм.*, при *Р*н , *кВт*.									
	до 0,2	0,2 – 1,0	1,0 – 2,5	2,5 – 5,0	5,0 – 10	10 – 20	20 – 50	60 – 100	100 – 200	200 – 300
500 – 1500	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,4	0,5	0,65	0,8	1,0
3000	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,65	0,8	1,0	1,25	1,5

Большое влияние на потребление электродвигателем реактивной мощности оказывает значительный сдвиг стали ротора вдоль оси электродвигателя, а также асимметрия воздушных зазоров. Появление сдвига стали ротора вызывает увеличение коэффициента рассеяния; что влечет за собой повышение потребления реактивной мощности и снижение коэффициента мощности. Для эффективного контроля за величиной коэффициента мощности и КПД отремонтированных электродвигателей необходимо до и после ремонта проверять ток холостого хода и потери активной мощности холостого хода. Критерием для оценки этих величин могут служить нормальные их значения, которые можно определить по методике, приведенной в настоящей главе. Данные этих величин целесообразно указывать в ремонтной карточке эксплуатируемых электродвигателей.

Глава III. Расчеты обмоток асинхронных электродвигателей при ремонте.

Общие сведения.

В таблицах и формулах данного раздела приняты следующие буквенные обозначения:

$U_Ф$ – напряжение фазы трехфазной обмотки;
$I_Ф$ – фазный ток трехфазной обмотки;
z_1 – число пазов статора;
z_2 – число пазов ротора;
m – число фаз;
у – шаг обмотки по пазам;
n – полное число проводников в пазе;
q – число пазов на полюс и фазу;
a – число параллельных ветвей;
d – диаметр круглого провода без изоляции;
D – диаметр круглого провода с изоляцией;
a, b – размеры сечения прямоугольного провода без изоляции;
r – сопротивление обмотки (фазы) при 15 °С;
M – масса провода обмотки;
$l_{СР}$ – средняя длина витка;
Da – наружный диаметр сердечника статора;
Di – внутренний диаметр сердечника статора;
l_1 – длина сердечника статора (радиальные вентиляционные каналы отсутствуют);
hп – полная глубина паза;
F – площадь паза;
$F' = F - (F_{ИЗ} - F_{КЛ})$ – свободная площадь паза, где $F_{ИЗ}$ – площадь, занимаемая изоляцией (пазовой коробочкой и прокладками);
$F_{КЛ}$ – площадь поперечного сечения клина;
N – число эффективных проводников в пазе;
$n_{ЭЛ}$ – число элементарных (параллельных) проводников;
δ – воздушный зазор.

Маркировка выводов обмоток.

Начала и концы обмоток асинхронных электродвигателей обозначают в соответствии с ГОСТ 183 – 74 (табл. 10). Выводы секционированных обмоток многоскоростных асинхронных электродвигателей, позволяющие изменять число полюсов, имеют следующие обозначения:

$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$	$2p = 12$
4С1	6С1	8С1	12С1
4С2	6С2	8С2	12С2
4С3	6С3	8С3	12С3

В малых машинах допускается обозначение выводных концов обмоток разноцветными проводами (табл. 11).

10. Обозначение выводов соединения обмоток.

Наименование, схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы и вывода	Обозначение выводов ГОСТ 26772* начало	ГОСТ 26772* конец	ГОСТ 26772** начало	ГОСТ 26772** конец
Обмотка статора, открытая схема	6	Первая фаза	C1	C4	U1	U2
		Вторая фаза	C2	C5	VI	V2
		Третья фаза	C3	C6	W1	W2
Обмотка статора, звезда	3 или 4	Первая фаза	C1		U	
		Вторая фаза	C2		V	
		Третья фаза	C3		W	
		Точка звезды	0		N	
Обмотка статора, треугольник	3	Первый вывод	C1		U	
		Второй вывод	C2		V	
		Третий вывод	C2		W	
Обмотка фазного ротора, открытая схема	6	Первая фаза	P1	P4	K1	K2
		Вторая фаза	P2	P5	L1	L2
		Третья фаза	P3	P6	M1	M2
Обмотка фазного ротора, звезда	3 или 4	Первая фаза	P1		K	
		Вторая фаза	P2		L	
		Третья фаза	P3		M	
		Точка звезды	0		Q	
Обмотка фазного ротора, треугольник	3	Первый вывод	P1		K	
		Второй вывод	P2		L	
		Третий вывод	P3		M	
Обмотка статора однофазных машин			начало	конец		
главная			C1	C2		
вспомогательная			B1	B2		

*Для электродвигателей, разработанных до 1987 г.
**Для вновь разрабатываемых электродвигателей.

11. Цветное обозначение выводных концов обмоток асинхронных электродвигателей.

Схема соединения обмоток	Число выводов	Вывод	Цвет начало	Цвет конец
Трехфазные электродвигатели				
Открытая	6	Первая фаза	Желтый	Желтый с черным
		Вторая фаза	Зеленый	Зеленый с черным
		Третья фаза	Красный	Красный с черным
Звездой	3 или 4	Первая фаза	Желтый	–
		Вторая фаза	Зеленый	–
		Третья фаза	Красный	–
		Нулевая точка	Черный	–
Треугольником	3	Первый зажим	Желтый	–
		Второй зажим	Зеленый	–
		Третий зажим	Красный	–
Однофазные электродвигатели				
–	4	Главная обмотка	Красный	Красный с черным
		Вспомогательная обмотка	Синий	Синий с черным
	3	Главная обмотка	Красный	–
		Вспомогательная обмотка	Синий	–
		Общая точка	Черный	–

Нагревостойкость изоляционных материалов. Классы изоляции обмоток.

Изоляционные материалы по нагревостойкости подразделяются на семь классов (табл. 12).

12. Классификация электроизоляционных материалов по нагревостойкости.

Обозначение класса нагревостойкости	Температура, характеризующая данный класс нагревостойкости, °С	Основные группы электроизоляционных материалов
Y	90	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального шелка, не пропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал.
A	105	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального, искусственного или синтетического шелка, в рабочем состоянии пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал.
E	120	Синтетические органические материалы (пленки, волокна, смолы, компаунды и т. д.) и другие материалы, которые могут работать при температуре до 120°С.
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с органическими связующими и пропитывающими составами.
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, соответствующими данному классу нагревостойкости.
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры
C	Свыше 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц и другие.

Нагрев обмоток.

Номинальные данные электрических машин соответствуют их работе при температуре газообразной охлаждающей среды 40°С. Предельно допустимые превышения температуры обмоток над температурой охлаждающей среды при этих условиях должны соответствовать данным табл. 13. При работе машины в условиях, отличающихся от указанных, номинальные данные должны быть изменены (см. ГОСТ 183 – 74).

13. Допустимые превышения температур обмоток, определяемые методом сопротивлений.

Обмотка	Превышение температуры, °С, при классе изоляции:				
	А	Е	В	F	Н
Переменного тока машин мощностью 5000 *кВА* и выше или с длиной сердечника 1 *м*. и более	60	70	80	100	125
Переменного тока машин мощностью менее 5000 *кВА* или с длиной сердечника менее 1 *м*.	60	75	80	100	125

Превышение температуры медной обмотки над температурой охлаждающего воздуха, определяемое методом сопротивлений, рассчитывается по формуле:

$$\theta = t_r - t_O = \frac{r_{\Gamma} - r_X}{r_X} \times (235 + t_X) - (t_X - t_O)$$

где t_{Γ} и t_X – температура обмотки в горячем и холодном состояниях, °С; r_{Γ} и r_X – сопротивление обмотки в горячем и холодном состояниях, *Ом*; t_0 – температура охлаждающего воздуха, °С. Если обмотка изготовлена из алюминия, то в формуле число 235 следует заменить числом 245.

Характеристика проводниковых материалов.

Свойства основных проводниковых материалов приведены в табл. 14.

14. Свойства проводниковых материалов.

Материал	Плотность, *г/см*^{3}	Температура плавления, °С	Предел прочности при растяжении, 10^{-6} *Па*	Удельное сопротивление при 20°С, Ом. *мм*^{2}*/м.*	Температурный коэффициент сопротивления α, град$^{-1}$
Алюминий	2,7	657	80 – 250	0,028	0,0040
Бронза	8,3 – 8,9	885 – 1050	310 – 1350	0,021 – 0,052	0,0040
Вольфрам	19,3	3380	1000 – 3000	0,055	0,0046
Железо	7,8	1535	–	0,098	0,0060
Латунь	8,4 – 8,7	900 – 960	300 – 700	0,031 – 0,079	0,0020
Молибден	10,2	2620	800 – 2500	0,057	0,0046
Медь	8,9	1083	270 – 450	0,0178	0,0040
Никель	8,9	1455	400 – 700	0,073	0,0065
Олово	7,3	232	20 – 50	0,12	0,0044
Сталь	7,8	1400 – 1530	450 – 1500	0,1 – 0,2	0,0050

Измеренное при температуре t сопротивление обмотки (медной и алюминиевой) можно привести к расчетным температурам 15° или 20° путем уменьшения его на соответствующий коэффициент:

t, °С	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
K_{15}	1,06	1,04	1,02	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88
K_{20}	1,08	1.06	1,04	1,02	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90

Примечание. Температурный коэффициент сопротивления α принят равным 0,0041.

Обмоточные провода.

При частичной или полной перемотке асинхронных электродвигателей особое внимание уделяется выбору марок обмоточных проводов (табл. 15 – 21).

15. Провода с эмалевой изоляцией.

Марка	Вид изоляции	Нагрево стойкость °С	Диаметр (размер) без изоляции, *мм.*
ПЭЛ	Эмаль на масляно – смоляной основе.	105	0,02 – 2,44
ПЭВ–1	Высокопрочная эмаль на поливинилацеталевой основе.	105	0,02 – 2,44
ПЭВ–2	То же, но с увеличенной толщиной.	105	0,06 – 2,44
ПЭМ–1	Высокопрочная эмаль на поливинилформалевой основе.	105	0,05 – 2,50
ПЭМ–2	То же, но с увеличенной толщиной.	105	0,05 – 2,50
ПЭЛР–1	Высокопрочная эмаль на полиамиднорезольной основе.	105	0,1 – 2,44
ПЭЛР–2	То же, но с увеличенной толщиной	105	0,1 – 2,44
ПЭВП	Высокопрочная эмаль "винифлекс"**, провод прямоугольный.*	105	а = 0,5 – 2,83 в = 2,1 – 8,8
ПЭВТЛ–1	Высокопрочная эмаль на полиуретановой основе.	120	0,05 – 1,56
ПЭВТЛ–2	То же, но с увеличенной толщиной	120	0,05 – 1,56
ПЭТВ–943	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе (лак П – 943).	130	0,06 – 2,44
ПЭТВ–939	То же	130	0,06 – 2,44
ПЭТВ–ТС	То же	130	0,06 – 2,44
ПЭТВ–F	То же	130 155	0,06 – 2,44 0,06 – 2,44
ПЭТВП	То же, провод прямоугольный.*	155 130	а = 0,8 – 3,55 в = 2,0 – 12,5
ПЭТ–155	Высокопрочная эмаль на полиэфиримидной основе.	155	0,06 – 2,50
ППЭТ–имид	Высокопрочная эмаль на полиамидной основе, жила никелированная.	200	0,1 – 1,3
ПЭВЛт**	Высокопрочная эмаль "винифлекс", жила из твердой (не отожженной) алюминиевой проволоки.	105	0,08 – 0,59
ПЭВА**	То же, но из проволоки отожженной.	105	0,51 – 2,44
ПЭТВА**	Полиэфирный лак.	130	0,14 – 0,20
ПЭТА**	Нагревостойкий полиамидный лак.	220	0,08 – 2,44

* *а* и *в* – стороны сечения прямоугольного провода. ** с алюминиевой жилой.

16. Провода с волокнистой и стекловолокнистой изоляцией.

Марка	Вид изоляции	Нагрево стойкость °С	Размеры провода без изоляции, *мм.*	
			круглого	прямоугольного
ПБД	Два слоя из хлопчатобумажной пряжи.	105	0,38 – 5,2	а = 0,9 – 5,5 в = 2,1 – 15
ПЛД	Два слоя из лавсанового волокна.	120	0,38 – 1,3	–
ПЛБД	Один слой из лавсанового волокна и один из хлопчатобумажной пряжи.	105	0,38 – 5,2	а = 0,9 – 5,5 в = 2,1 – 14,5
ПШД	Два слоя из натурального шелка.	105	–	а = 0,8 – 1,35 в = 3,53 – 4,7
АПБД*	Два слоя из хлопчатобумажной пряжи.	105	1,35 – 8	а = 1,81 – 7,0 в = 4,1 – 18
АПЛБД*	Один слой из лавсанового волокна и один слой из хлопчатобумажной пряжи.	105	1,35 – 8	а = 1,81 – 7,0 в = 4,1 – 18
ПСД ПСД–Л**	Два слоя из стекловолокна с пропиткой каждого слоя нагревостойким лаком	155	0,31 – 5,2	а = 0,9 – 5,0 в = 2,1 – 12,5
ПСДТ ПСДТ–Л**	Два слоя из утоненного стекловолокна с пропиткой каждого слоя нагревостойким лаком	155	0,31 – 2,0	–
ПСДК ПСДК–Л**	Два слоя из стекловолокна с пропиткой каждого слоя кремнийорганическим лаком	180	0,31 – 5,2	–

ПСДКТ ПСДКТ–Л**	Два слоя из утоненного стекловолокна с пропиткой каждого слоя кремнийорганическим лаком	180	0,31 – 2,1	а = 0,9 – 3,55 в = 2,1 – 10
ПЭТКСОТ	Слой кремнийорганической эмали и обмотка из утоненного стекловолокна с пропиткой кремнийорганическим лаком	180	0,33 – 1,56	а = 0,83 – 1,45 в = 2,1 – 4,7
ПНЭТКСОТ	Слой полиамидной эмали и обмотка из утоненного стекловолокна с пропиткой кремнийорганическим лаком, жила никелированная	220	0,20 и 0,31	–

* С алюминиевой жилой. ** С дополнительной лакировкой поверхности провода.

17. Провода с эмалевоволокнистой изоляцией.

Марка	Вид изоляции	Нагревостойкость °С	Диаметр без изоляции, *мм.*
ПЭЛБО	Эмаль на масляно – смоляной основе и один слой обмотки из хлопчатобумажной пряжи.	105	0,38 – 2,1
ПЭЛБД	То же, но два слоя обмотки из хлопчатобумажной пряжи.	105	0,93 – 2,1
ПЭВБД	Эмаль "винифлекс" и два слоя обмотки из хлопчатобумажной пряжи.	105	0,93 – 2,1
ПЭЛШО	Эмаль на масляно – смоляной основе и один слой обмотки из натурального шелка.	105	0,05 – 1,56
ПЭЛШКО	Эмаль на масляно – смоляной основе и один слой обмотки из капроновых нитей.	105	0,1 – 1,56
ПЭЛШКД	То же, но два слоя обмотки из капроновых нитей	105	0,72 – 1,45
ПЭВШО	Эмаль "винифлекс" и один слой обмотки из натурального шелка.	105	0,2 – 1,5
ПЭЛЛО	Эмаль на масляно – смоляной основе и один слой обмотки из лавсановых нитей.	105	0,05 – 1,3
ПЭВЛО	Эмаль "винифлекс" или "металвин" и один слой обмотки из лавсанового волокна.	105	0,06 – 1,3
ПЭТЛО	Эмаль повышенной нагревостойкости и один слой обмотки из лавсанового. волокна.	130	0,2 – 1,3

18. Размеры круглой проволоки для обмоточных проводов (d – диаметр, S – сечение)

d, *мм.*	S, *мм*^{2}	d, *мм.*	S, *мм*^{2}	d, *мм.*	S, *мм*^{2}	d, *мм.*	S, *мм*^{2}	d, *мм.*	S, *мм*^{2}	d, *мм.*	S, *мм*^{2}
0,02	0,000314	0,15	0,0177	0,355	0,099	0,64	0,322	1,04	0,849	1,68	2,22
0,03	0,000707	0,16	0,0201	0,38	0,113	0,67	0,353	1,06	0,882	1,70	2,27
0,04	0,00126	0,17	0,0227	0,40	0,126	0,69	0,374	1,08	0,916	1,74	2,38
0,05	0,00196	0,18	0,0254	0,41	0,132	0,71	0,396	1,12	0,985	1,80	2,54
0,06	0,00283	0,19	0,72	0,44	0,152	0,407	1,81	1,16	1,06	1,81	2,57
0,063	0,00312	0,20	0,74	0,45	0,159	0,430	1,88	1,18	1,09	1,88	2,78
0,07	0,00385	0,21	0,75	0,47	0,173	0,442	1,90	1,20	1,13	1,90	2,84
0,071	0,00396	0,224	0,77	0,49	0,189	0,466	1,95	1,25	1,23	1 95	2,99
0,08	0,00503	0,23	0,80	0,50	0,196	0,503	2,00	1,30	1,33	2,00	3,14
0,09	0,00636	0,25	0,83	0,51	0,204	0,541	2,02	1,32	1,37	2,02	3,20
0,10	0,00785	0,27	0,85	0,53	0,221	0,567	2,10	1,35	1,43	2,10	3,46
0,11	0,0095	0,28	0,86	0,55	0,238	0,581	2,12	1,40	1,54	2,12	3,53
0,112	0,00985	0,29	0,90	0,56	0,246	0,636	2,24	1,45	1,65	2,24	3,94
0,12	0,0113	0,31	0,93	0,57	0,255	0,679	2,26	1,50	1,77	2,26	4,01
0,125	0,0123	0,315	0,95	0,59	0,273	0,709	2,36	1,56	1,91	2,36	4,37
0,13	0,0133	0,33	0,96	0,62	0,302	0,724	2,44	1,60	2,01	2,44	4,68
0,14	0,0154	0,35	1,00	0,63	0,312	0,785	2,50	1,62	2,06	2,50	4,91

19. Диаметры проводов с эмалевой изоляцией.

Диаметр проволоки, *мм.*	Максимальный диаметр провода, *мм.*				Диаметр проволоки, *мм.*	Максимальный диаметр провода, *мм.*		
	ПЭЛ	ПЭВ–1 ПЭВТЛ–1	ПЭВ–2 ПЭТВ* ПЭВТЛ-2	ПЭВА ПЭВАт		ПЭМ–1	ПЭМ–2	ПЭТ–155
0,020	0,035	0,035	–	–	0,050	0,070	0,080	–
0,025	0,040	0,040	–	–	0,060	0,085**	0,090**	0,90
0,030	0,045	0,045	–	–	0,063	0,088	0,093	–
0,040	0,055	0,055	–	–	0,070	0,095**	0,100**	0,10
0,050	0,065	0,070	0,080	–	0,071	0,095	0,101	–
0,060	0,075	0,085	0,090	–	0,080	0,105	0,110	0,11
0,070	0,085	0,095	0,100	–	0,090	0,115	0,120	0,12
0,080	0,095	0,105	0,110	0,105	0,100	0,125	0,130	0,13
0,090	0,105	0,115	0,120	0,115	0,110	0,135**	0,140**	0,14**
0,100	0,120	0,125	0,130	0,125	0,112	0,137	0,142	0,14
0,110	0,130	0,135	0,140	0,135	0,120	0,145**	0,150**	0,15
0,120	0,140	0,145	0,150	0,145	0,125	0,150	0,155	–
0,130	0,150	0,155	0,160	0,155	0,130	0,155**	0,160**	0,16**
0,140	0,160	0,165	0,170	0,165	0,140	0,165	0,170	0,17
0,150	0,170	0,180	0,190	0,180	0,150	0,180**	0,190**	0,19**
0,160	0,180	0,190	0,200	0,190	0,160	0,190	0,200	0,20
0,170	0,190	0,200	0,210	0,200	0,170	0,200	0,210**	0,21**
0,180	0,200	0,210	0,220	0,210	0,180	0,210	0,220	0,22
0,190	0,210	0,220	0,230	0,220	0,190	0,220**	0,230**	0,23**
0,200	0,225	0,230	0,240	0,230	0,200	0,230	0,240	0,24
0,210	0,235	0,240	0,250	0,240	0,210	0,240**	0,250**	0,26**
0,230	0,255	0,270	0,280	0,270	0,224	0,254	0,264	0,27
0,250	0,275	0,290	0,300	0,290	0,230	0,270**	0,280**	0,28**
0,270	0,310	0,310	0,320	0,310	0,250	0,290	0,300	0,30
0,290	0,330	0,330	0,340	0,330	0,270	0,310**	0,320**	0,32**
0,310	0,350	0,350	0,360	0,350	0,280	0,320	0,330	0,33
0,330	0,370	0,370	0,380	0,370	0,290	0,330**	0,340**	0,34**
0,350	0,390	0,390	0,410	0,390	0,310	0,350**	0,360**	0,36
0,380	0,420	0,420	0,440	0,430	0,315	0,355	0,365	–
0,410	0,450	0,450	0,470	0,460	0,330	0,370**	0,380**	0,38**
0,440	0,490	0,480	0,500	0,490	0,350	0,390**	0,410**	0,40
0,470	0,520	0,510	0,530	0,520	0,355	0,395	0,415	–
0,490	0,540	0,530	0,550	0,540	0,380	0,420**	0,440**	0,44**
0,510	0,560	0,560	0,580	0,570	0,400	0,440	0,460	0,46
0,530	0,580	0,580	0,600	0,590	0,410	0,450**	0 470**	0,47**
0,550	0,600	0,600	0,620	0,610	0,440	0,480**	0,500**	0,51**
0,570	0,620	0,620	0,640	0,630	0,450	0,490	0,510	0,52
0,590	0,640	0,640	0,660	0,650	0,470	0,510**	0,530**	0,54**
0,620	0,670	0,670	0,690	0,670	0,490	0,530**	0,550**	0,56**
0,640	0,690	0,690	0,720	0,700	0,500	0,550	0,570	0,57
0,670	0,720	0,720	0,750	0,730	0,510	0,560**	0,580**	0,58**
0,690	0,740	0,740	0,770	0,750	0,530	0,580**	0,600**	0,60**
0,720	0,780	0,770	0,800	0,780	0,550	0,600**	0,620**	0,62**
0,740	0,800	0,800	0,830	0,810	0,560	0,610	0,630	0,63
0,770	0,830	0,830	0,860	0,840	0,570	0,620**	0,640**	0,64**
0,800	0,860	0,860	0,890	0,870	0,590	0,640**	0,660	0,66**

Продолжение таблицы 19.

Диаметр проволоки, *мм.*	Максимальный диаметр провода, *мм.*				Диаметр проволоки, *мм.*	Максимальный диаметр провода, *мм.*		
	ПЭЛ	ПЭВ–1 ПЭВТЛ–1	ПЭВ–2 ПЭТВ* ПЭВТЛ-2	ПЭВА ПЭВАт		ПЭМ–1	ПЭМ–2	ПЭТ–155
0,830	0,890	0,890	0,920	0,900	0,620**	0,670**	0,690**	0,70**
0,860	0,920	0,920	0,960	0,950	0,630**	0,680**	0,700	0,71
0,900	0,960	0,960	0,990	0,970	0,640	0,690**	0,720**	0,72**
0,930	0,990	0,990	1,020	1,000	0,670	0 720**	0,750**	0,75**
0,960	1,020	1,020	1,050	1,030	0,690	0,740**	0,770**	0,77**
1,000	1,070	1,080	1,110	1,090	0,710	0,760	0,790	0,79
1,040	1,120	1,120	1,150	1,130	0,720	0,770**	0,800**	0,80
1,080	1,160	1,160	1,190	1,170	0,740	0,800**	0,830**	0,82**
1,120	1,200	1,200	1,230	1,210	0,750	0,810	0,840	0,83
1,160	1,240	1,240	1,270	1,250	0,770	0,830**	0,860**	0,85**
1,200	1,280	1,280	1,310	1,290	0,800	0,860	0,890	0,89
1,250	1,330	1,330	1,360	1,340	0,830	0,890**	0 920**	0,92**
1,300	1,380	1,380	1,410	1,390	0,850	0,910	0,940	0,94
1,350	1,430	1,430	1,460	1,440	0,860	0,920**	0,950**	0,95**
1,400	1,480	1,480	1,510	1,490	0,900	0,960	0,990	0,99
1,450	1,530	1,530	1,560	1,540	0,930	0,990**	1,020**	1,02**
1,500	1,580	1,580	1,610	1,590	0,950	1,010	1,040	1,04
1,560	1,640	1,640	1,670	1,650	0,960	1,020**	1,050**	1,05**
1,620	1,710	1,700	1,730	1,720	1,000	1,080	1,110	1,09
1,680	1,770	1,760	1,790	1,780	1,040	1,120	1,150	1,14**
1,740	1,830	1,820	1,850	1,840	1,060	1,140	1,170	1,16
1,810	1,900	1,900	1,930	1,920	1,080	1,160**	1,190**	1,18**
1,880	1,970	1,970	2,000	1,990	1,120	1,200	1,230	1,22
1,950	2,040	2,040	2,070	2,060	1,160	1,240**	1,270**	1,26**
2,020	2,120	2,110	2,140	2,130	1,180	1,260	1,290	1,28
2,100	2,200	2,200	2,230	2,210	1,200	1,280**	1,310**	1,30**
2,26	2,360	2,360	2,390	2,370	1,250	1,330	1,360	1,35
2,44	2,540	2,540	2,570	2,550	1,300	1,380**	1,410**	1,40**

Диаметр проволоки, *мм.*	Максимальный диаметр провода, *мм.*			Диаметр проволоки, *мм.*	Максимальный диаметр провода, *мм.*		
	ПЭМ–1	ПЭМ–2	ПЭТ–155		ПЭМ–1	ПЭМ–2	ПЭТ–155
1,320	1,400	1,430	1,42	1,880	1,970*	2,000*	2,00*
1,350	1,430*	1,460*	1,45*	1,900	1,990	2,020	2,02
1,400	1,480	1,510	1,51	1,950	2,040*	2,070*	2,07*
1,450	1,530*	1,560*	1,56	2,000	2,090	2,120	2,12
1,500	1,580	1,610	1,61	2,020	2,110*	2,140*	2,14*
1,560	1,640*	1,670*	1,67*	2,100	2,200*	2,230*	2,22*
1,600	1,680	1,710	1,71	2,120	2,220	2,250	2,24
1,620	1,700*	1,730*	1,73*	2,240	2,340	2,370	2,37
1,680	1,760*	1,790*	1,79*	2,260	2,350*	2,390*	2,39*
1,700	1,780	1,810	1,81	2,360	2,460	2,490	2,49
1,740	1,820*	1,850*	1,85*	2,440	2,540*	2,570*	2,57*
1,800	1,890	1,910	1,92	2,500	2,600	2,630	2,63
1,810	1,900*	1,930*	1,93*				

* Марки ПЭТВ–943, ПЭТВ–939, ПЭТВ–ТС, ПЭТВ–F. ** В новых разработках применять не разрешается.

20. Диаметральная (двусторонняя) толщина стекловолокнистой изоляции круглых проводов, *мм*.

Диаметр проволоки, *мм.*	ПСД ПСДК	ПСД–Л ПСДК–Л	ПСДТ	ПСДТ–Л	ПСДКТ	ПСДКТ–Л
0,31 – 0,49	0,23	0,25	0,18	0,20	0,14	0,16
0,51 – 0,69	0,25	0,27	0,19	0,21	0,16	0,18
0,72 – 0,96	0,25	0,27	0,20	0,22	0,16	0,18
1,00 – 1,56	0,27	0,29	0,21	0,23	0,18	0,20
1,62 – 1,74	0,27	0,29	0,21	0,25	0,22	0,24
1,81 – 2,10	0,27	0,29	0,23	0,25	0,22	0,24
2,26 – 5,20	0,33	0,35	–	–	–	–

21. Диаметральная (двусторонняя) толщина эмалевоволокнистой и волокнистой изоляции круглых проводов, *мм*.

Диаметр проволоки, *мм.*	ПЭЛШО, ПЭЛЛО*	ПЭВЛО	ПЭЛБО	ПБД	АПБД
0,05	0,08	–	–	–	–
0,06 – 0,14	0,08	0,09	–	–	–
0,15 – 0,19	0,08	0,10	–	–	–
0,20 – 0,21	0,09	0,11	–	–	–
0,23 – 0,25	0,09	0,12	–	–	–
0,27 – 0,33	0,11	0,12	–	–	–
0,35	0,11	0,13	–	–	–
0,38 – 0,41	0,11	0,13	0,17	0,22	–
0,44 – 0,49	0,12	0,13	0,17	0,22	–
0,51 – 0,62	0,12	0,14	0,17	0,22	–
0,64 – 0,69	0,12	0,15	0,17	0,22	–
0,72 – 0,96	0,13	0,15	0,18	0,22	–
1,00 – 1,30	0,14	0,17	0,21	0,27	–
1,35 – 1,45	0,14	–	0,21	0,27	0,27
1,50 – 1,56	0,16	–	0,21	0,27	0,27
1,62 – 2,10	–	–	0,22	0,27	0,27
2,26 – 5,20	–	–	–	0,33	0,33
6,00 – 8,00	–	–	–	–	0,33

* Изготовляются с проволокой диаметром 0,05 – 1,30 *мм*.

Толщина изоляции прямоугольных проводов (B – b) (рис. 9) определяется в зависимости от размера проволоки по стороне a (табл. 22, 23), толщина изоляции (A – a) зависит от размера b.

22. Толщина хлопчатобумажной изоляции проводов.

Марка провода	Толщина изоляции (B – $в$), *мм.*, при размере меньшей стороны сечения проволоки a, *мм.*				
	0,9 – 1,68	1,81 – 1,95	2,1 – 3,8	4,1 – 5,5	6,0 – 7,0
ПБД	0,27	0,27	0,33	0,44	–
АПБД	–	0,27	0,33	0,44	0,47

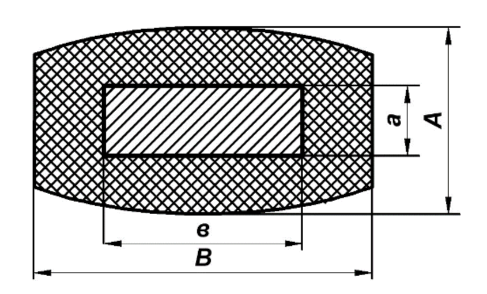


Рис. 9. Размеры прямоугольного обмоточного провода с хлопчатобумажной и стекловолокнистой изоляцией.

23. Толщина стекловолокнистой изоляции проводов.

Марка провода	Толщина изоляции (A – а), *мм.*, при размере большей стороны сечения проволоки b, *мм*		
	0,90 – 2,00	2,10 – 3,80	4 – 5,60
ПСД, ПСДК	0,27	0,33	0,40
ПСД–Л, ПСДК–Л	0,27	0,35	0,42
ПСДКТ	0,22	0,22	–
ПСДКТ–Л	0,24	0,24	–

Продолжение таблицы. 23.

Марка провода	Толщина изоляции (A – a), *мм.*, при размере большей стороны сечения проволоки b, *мм.*						
	2,10 -2,50	2,63 – 3,35	3,53 – 4,50	4,70 – 5,60	5,90 – 7,10	7,4 – 8,0	8,5 – 12,5
ПСД, ПСДК, ПСД–Л	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48
ПСДК–Л	0,34	0,38	0,41	0,44	0,46	0,48	0,50
ПСДКТ	0,26	0,28	0,28	0,30	0,30	0,32	0,32
ПСДКТ–Л	0,28	0,30	0,30	0,32	0,32	0,34	0,34

24. Номинальные размеры a, b проволоки
и максимальные размеры провода по изоляции А, В.

a, *мм.*	А, *мм.*	*в*, *мм.*	B, *мм.* при размере a, *мм.*		
			0,8 – 1,18	1,25 – 2,00	2,12 – 3,55
0,8	a ± 0,14	2,00 – 4,50	*в* ± 0,16	*в* ± 0,17	*в* ± 0,18
0,85 – 1,12	a ± 0,15	2,75 – 9,00	*в* ± 0,19	*в* ± 0,20	*в* ± 0,21
1,18 – 2,00	a ± 0,16	9,5 – 12,5	–	*в* ± 0,20	*в* ± 0,21
2,12 – 3,15	a ± 0,18	–	–	–	–
3,35 – 3,55	a ± 0,19	–	–	–	–

Выбор основных величин обмоток при ремонте.

Шаги двухслойных обмоток статора асинхронных электродвигателей берут из табл. 25. Шаг двухслойных обмоток принимают укороченным:

$$y = \frac{\beta \times z_1}{2p}$$

где β – укорочение шага; z_1 – число пазов статора; $2p$ – число полюсов.
Для многополюсных обмоток обычно β = 0,83, для двухполюсных β = 0,61 – 0,75, в отдельных случаях его уменьшают до 0,56, чтобы облегчить укладку и уменьшить вылет лобовой части обмотки.

25. Шаги двухслойных обмоток статора электродвигателей.

$2p$	y при числе пазов статора z_1							
	24	36	45	48	54	60	72	75
2	8, 9	10, 11, 12, 13	–	15, 16, 17	–	–	–	–
4	–	7	–	9, 10	–	12, 13	–	–
6	–	5	6, 7	–	7, 8	–	9, 10	–
8	–	4	–	5	5, 6	6, 7	7	–
10	–	–	–	–	–	5	–	6, 7

Примечание. Двухслойные обмотки применяют в трехфазных электродвигателях единых серий при наружном диаметре статора более 200 – 250 *мм.*, при меньших диаметрах обычно используют однослойные обмотки.

Полюсное деление (*см.*) – часть длины окружности расточки статора, приходящейся на один полюс, – определяется по формуле:

$$\tau = \frac{3{,}14 \times Di}{2p}$$

где Di – внутренний диаметр статора, *см*. Число параллельных ветвей a и элементарных (параллельных) проводников $n_{эл}$ обмотки статора асинхронного электродвигателя зависит от его мощности и напряжения. Для предварительного выбора этих чисел можно использовать их зависимость от наружного диаметра Da статора (табл. 26).

26. Значения a и $n_{эл}$ в сериях асинхронных электродвигателей.

2p	при *Da*, *см.*									
	до 15		15 – 20		20 – 25		25 – 35		35 – 50	
	a	$n_{эл}$	*a*	$n_{эл}$	*a*	$n_{эл}$	*a*	$n_{эл}$	*a*	$n_{эл}$
2	1	1	1	1, 2, 3	1, 2	2, 3, 4	2	2, 3, 4	2	3 – 11
4	1	1	1	1, 2	1	1, 2, 3	1,2	1, 2, 3	2, 4	2, 3, 4, 5
6	1	1	1	1, 2	1	1, 2, 3	1,2	1, 2, 3	2, 3	2, 3, 4, 5
8	–	–	–	–	–	–	1,2	1, 2, 3	2, 4	2, 3, 4
10	–	–	–	–	–	–	–	–	2	2, 3, 4

Примечания: Большие значения a и $n_{эл}$ выбирают при меньшем напряжении и большей длине сердечника. Окончательные значения a и $n_{эл}$ уточняются после выбора диаметра провода и проверки размещения обмотки в пазе.
Обмоточный коэффициент Kоб трехфазных однослойных обмоток определяется числом пазов на полюс и фазу q (табл. 27), двухслойных – также и шагом у (табл. 28).

27. Обмоточные коэффициенты трехфазной однослойной шестизонной обмотки со сплошной фазной зоной.

q	*K*об	*q*	*K*об
1	1,000	4	0,958
1,5	0,960	4,5	0,955
2	0,966	5	0,957
2,5	0,957	6	0,957
3	0,960	8	0,956
3,5	0,956	–	–

При ремонте обмоток и предварительном выборе диаметра провода используют коэффициент заполнения паза, определяемый как отношение площади изолированных проводников к площади паза:

$$K\text{п} = \frac{0{,}785 \times \pi \times D^2}{F}$$

Величина его (табл. 29) зависит от формы паза и типа обмотки. Диаметр провода d без изоляции зависит от размеров машины:

Da, *см.*	до 15	15 – 25	25 – 35	35 – 50
d, *мм.*	0,49 – 1,25	0,67 – 1,56	1,0 – 1,62	1,16 – 1,95

Диаметр изолированного провода должен быть меньше ширины шлица (прорези) паза на 1 – 1,5 *мм*. При выборе диаметра провода следует по возможности принимать размеры, которые рекомендованы стандартами для новых разработок (см. табл. 19).
Полное число проводников в пазе определяется по формуле:

$$n = n_{эл} \times N$$

где N – число эффективных проводников в пазе. При пересчете обмоток индекс "ст" присваивается старой обмотке, индекс "нов" – новой (после перемотки): $U_{ст}$, $U_{нов}$, $N_{ст}$, $N_{нов}$ и т. д.

28. Обмоточные коэффициенты трехфазной двухслойной шестизонной обмотки.

*К*об при шаге обмотки по пазам																
q	1–3	1–4	1–5	1–6	1–7	1–8	1–9	1–10	1–11	1–12	1–13	1–14	1–15	1–16	1–17	1–18
1	0,866	1,000	0,866	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1½	–	0,831	0,945	0,945	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	–	–	0,836	0,933	0,966	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2¼	–	–	–	0,877	0,941	0,954	0,915	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2½	–	–	–	0,827	0,907	0,950	0,950	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	–	–	–	–	0,831	0,902	0,945	0,960	–	–	–	–	–	–	–	–
3½	–	–	–	–	–	0,831	0,884	0,930	0,953	0,953	–	–	–	–	–	–
4	–	–	–	–	–	–	0,831	0,885	0,926	0,950	0,958	–	–	–	–	–
4½	–	–	–	–	–	–	–	0,827	0,877	0,916	0,940	0,954	0,954	–	–	–
5	–	–	–	–	–	–	–	–	0,829	0,875	0,910	0,935	0,951	0,957	–	–
5½	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,827	0,869	0,902	0,928	0,945	0,954	0,954
6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,828	0,866	0,900	0,925	0,942	0,952
8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,719	0,758	0,794	0,828	0,876

29. Величина коэффициента *К*п.

Обмотка	Паз	*К*п при мощности, *кВт.*		
		до 1	1 – 10	10 – 100
Однослойная	Трапецеидальный (рис. 10, *а*, *б*, *г*)	0,37	0,40	0,43
	Грушевидный (рис. 10, *в*)	0,42	0,46	0,50
Двухслойная	Трапецеидальный (рис. 10, *а*, *б*, *г*)	0,86	0,37	0,40
	Грушевидный (рис. 10, *в*)	0,37	0,40	0,43

Площади пазов (*мм*²) определяются по следующим формулам (число π = 3,141/2 ≈ 1,57): трапецеидальный паз со скругленной частью под клин (рис. 10, а):

$$F\text{а} = 1{,}57 \times r_1^2 + 0{,}5 \times (h_1 - r_1) \times (b_1 + b_2)$$

трапецеидальный паз (рис. 10, б):

$$F\text{б} = 0{,}5 \times h_2 \times (b_1 + b_3) + 0{,}5 \times (h_1 - h_2) \times (b_1 + b_2)$$

грушевидный паз (рис. 10, в):

$$F\text{в} = 1{,}57 \times (r_1^2 + r_2^2) + 0{,}5 \times (h_1 - r_1) \times (b_1 + b_2)$$

трапецеидальный паз со скругленной частью под клин и скруглениями на дне паза (рис. 10, г):

$$F\text{г} = 1{,}57 \times (r_1^2 + \text{г}_2^2) + 0{,}5 \times (h_1 - r_1) \times (b_1 + b_2) + r_2 \times (b_2 - 2 \times r_2)$$

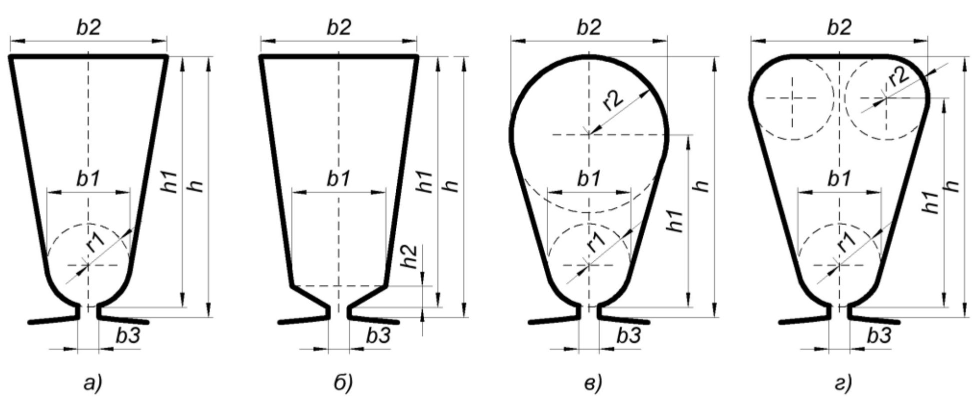


Рис. 10. Формы пазов статора для всыпных обмоток.

С достаточной для практических расчетов точностью площадь трапецеидального паза можно определить по рис. 11.

Площади пазов (рис. 10, а, б) принимают одинаковыми. При пересчете обмоток в тех случаях, когда известны данные старой обмотки (число проводников в пазе *n*, диаметр *d*, марка провода), для проверки размещения новой обмотки в пазе используют формулу:

$$n_{\text{НОВ}} \times D^2_{\text{НОВ}} \leq n_{\text{СТ}} \times D^2_{\text{СТ}}$$

где: $n_{\text{НОВ}}$ и $D_{\text{НОВ}}$– число проводников в пазе и диаметр изолированного провода новой обмотки, *мм*; $n_{\text{СТ}}$ и $D_{\text{СТ}}$ – то же старой обмотки.

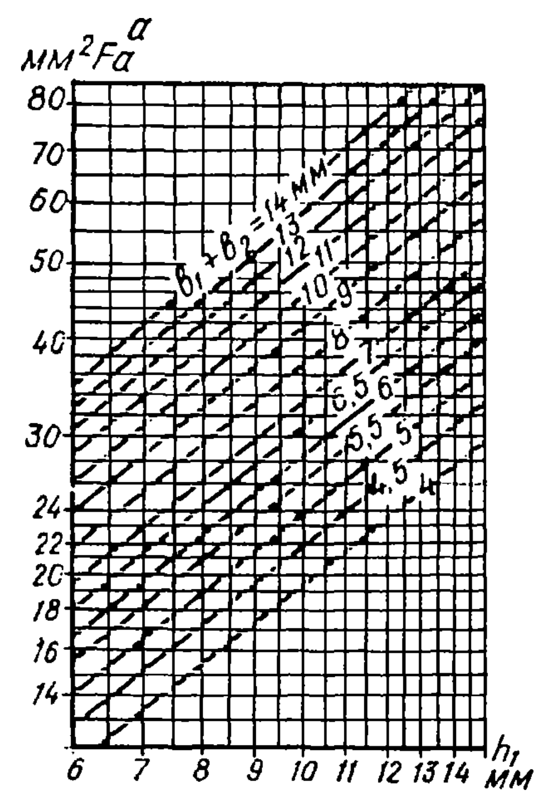


Рис. 11а. Площади паза при его высоте: до 14 *мм.*

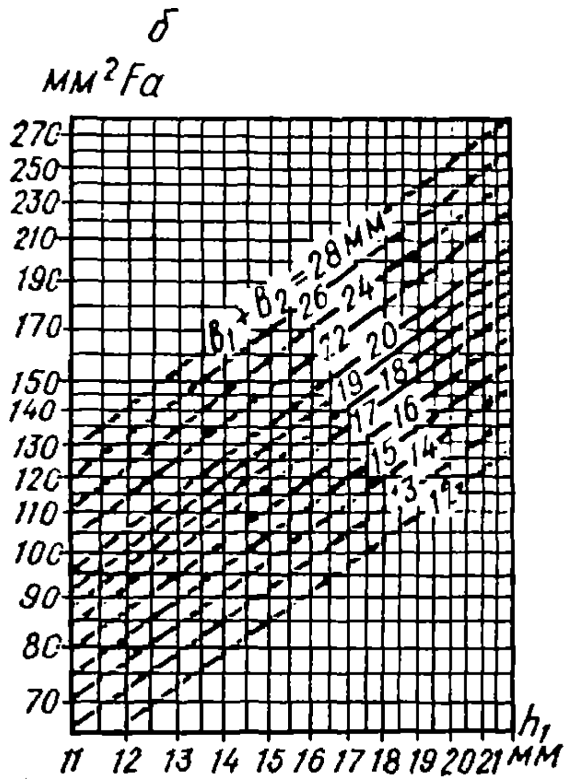


Рис. 11б. Площади паза при его высоте: от 14 до 22 *мм*.

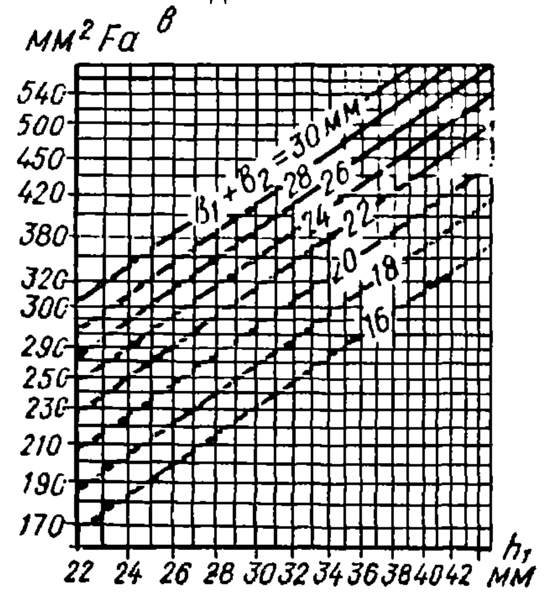


Рис. 11в. Площади паза при его высоте: свыше 22 *мм*.

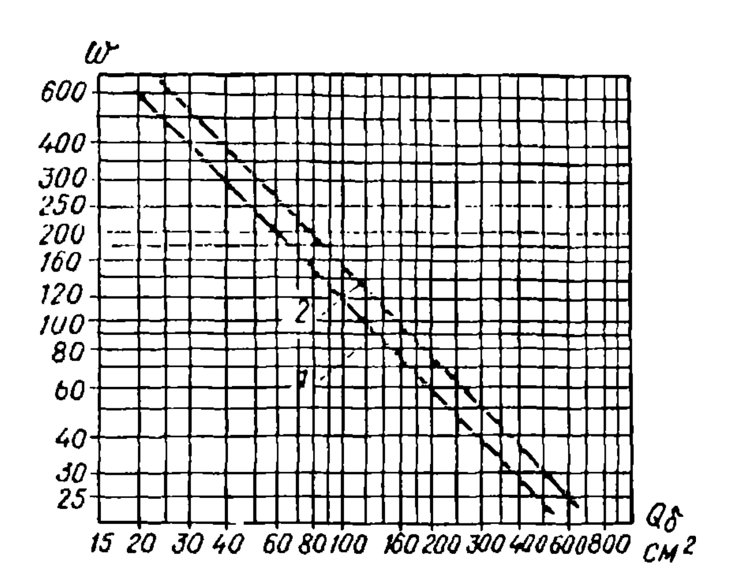


Рис. 12. Число последовательно соединенных витков в фазе *w* в зависимости от площади полюсного деления *Q* при напряжении $U_{\text{Н}}$ = 127 *В*:
1 – при 2*p* = 2; 2 – при 2*p* > 2

30. Квадраты чисел.

Целая часть и десятые доли числа	Квадраты числа при сотых долях									
	0,1	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	0,0400	0,0441	0,0484	0,0529	0,0576	0,0625	0,0676	0,0729	0,0784	0,0841
0,3	0,0900	0,0961	0,1024	0,1089	0,1156	0,1225	0,1296	0,1389	0,1444	0,1521
0,4	0,1600	0,1680	0,1760	0,1850	0,1940	0,2020	0,2120	0,2210	0,2300	0,2400
0,5	0,2500	0,2600	0,2700	0,2810	0,2920	0,3020	0,3140	0,3250	0,3360	0,3480
0,6	0,3600	0,3720	0,3840	0,3970	0,4100	0,4220	0,4360	0 4490	0,4620	0 4760
0,7	0,4900	0 5040	0,5180	0,5330	0,5480	0,5620	0,5780	0,5930	0,6080	0,6240
0,8	0,6400	0,6560	0,6720	0,6890	0,7060	0,7220	0,7400	0,7570	0,7740	0,7920
0,9	0,8100	0,8280	0 8460	0,8650	0,8840	0,9020	0,9220	0,9410	0,9600	0,9800
1,0	1,0000	1,0200	1,0400	1,0600	1,0800	1,1000	1,1200	1,1400	1,1700	1,1900
1,1	1,2100	1,2300	1,2500	1 2800	1,3000	1,3200	1,3500	1,3700	1 3900	1,4200
1,2	1,4400	1,4600	1,4900	1,5100	1,5400	1,5600	1,5900	1,6100	1,6400	1,6600
1,3	1,6900	1,7200	1 7400	1,7700	1,8000	1,8200	1,8500	1,8800	1,9000	1,9300
1,4	1,9600	1,9900	2,0200	2,0400	2,0700	2,1000	2,1300	2,1600	2,1990	2,2200
1,5	2,2500	2,2800	2,3100	2,3400	2,3700	2,4000	2,4300	2,4600	2,5000	2,5300
1,6	2,5600	2,5900	2,6200	2,6600	2,6900	2,7200	2,7600	2,7900	2,8200	2,8600
1,7	2,8900	2,9200	2,9600	2,9900	3,0300	3,0600	3,1000	3,1300	3,1700	3,2000
1,8	3,2400	3,2800	3,3100	3,3500	3,3900	3,4200	3,4600	3,9700	3,5300	3,5700
1,9	3,6100	3,6500	3,6900	3,7200	3,7600	3,8000	3,8400	3,8800	3,9200	3,9600
2,0	4,0000	4,0400	4,0800	4,1200	4,1600	4,2000	4,2400	4,2800	4,3300	4,3700
2,1	4,4100	4,4500	4,4900	4,5400	4,5800	4,6200	4,6700	4,7100	4,7500	4,8000
2,2	4,8400	4,8800	4,9200	4,9700	5,0200	5,0600	5,1100	5,1500	5,2000	5,2400
2,3	5,2900	5,3400	5,3800	5,4300	5,4800	5,5200	5,5700	5,6200	5,6600	5,7100
2,4	5,7600	5,8100	5,8600	5,9000	5,9500	6,0000	5,0500	6,1000	6,1500	6,2000
2,5	6,2500	6 3000	6,3500	6,4000	6,4500	6,5000	6,5500	6 6000	6,6600	6,7100
2,6	6,7600	6,8100	6,8600	6,9100	6,9700	7,0200	7,0800	7,1300	7,1800	7,2400
2,7	7,2900	7,3400	7,4000	7,4500	7,5100	7,5600	7,6100	7,6700	7,7300	7,7800

При сравнении заполнения паза старой и новой обмоткой необходимо учитывать Изменение числа слоев. Если двухслойная обмотка заменяется однослойной, коэффициент заполнения может быть увеличен, при замене однослойной обмотки двухслойной – уменьшен (см. табл. 27). Для удобства проверки приводится табл. 30 квадратов диаметров.

Пример 10. Мощность электродвигателя 4,5 *кВт*. Данные старой обмотки: $n_{\text{СТ}} = 51$, $D_{\text{СТ}} = 0{,}86$ *мм.*; данные новой обмотки: $n_{\text{НОВ}} = 89$, $D_{\text{НОВ}} = 0{,}6$ *мм*. Однослойная обмотка заменяется двухслойной. Паз грушевидный (рис. 11, в). Проверить возможность размещения новой обмотки в пазе.

По табл. 30 находим $D^2_{\text{СТ}} = 0{,}86^2 = 0{,}74$ (на пересечении строки 0,8 и графы 0,06); $D^2_{\text{НОВ}} = 0{,}6^2 = 0{,}36$; $n_{\text{СТ}} \times D^2_{\text{СТ}} = 51 \times 0{,}74 = 37{,}8$; $n_{\text{НОВ}} \times D^2_{\text{НОВ}} = 89 - 0{,}36 = 32$.
Для грушевидного паза (см. табл. 29) при мощности 4,5 *кВт*. коэффициент заполнения равен 0,46 для однослойной обмотки и 0,40 – для двухслойной.
Уточним результат вычисления заполнения паза новой обмоткой:

$$\frac{32 \times 0{,}46}{0{,}4} = 36{,}8 < 37{,}8$$

Значит, обмотка в пазе размещается.

Определение числа полюсов трехфазной обмотки статора.

Число полюсов для двухслойной обмотки при известном шаге:

$$2p \approx \frac{(0{,}8 \div 1) \times z_1}{y}$$

где z_1 – число пазов статора, y – шаг обмотки статора.
Если по формуле получается результат больше двух, но меньше четырех, то следует принять $2p = 2$. Например, при $z_1 = 36$ и $y = 10$.

$$2p \approx \frac{(0{,}8 \div 1) \times 36}{10} \approx 2{,}9 \div 3{,}6 \approx 2$$

Число полюсов для однослойной или двухслойной обмотки при известном числе пазов на полюс и фазу q:

$$2p = \frac{z_1}{3 \times q}$$

В однослойных концентрических и шаблонных обмотках, где катушки расположены одна в центре другой, число q можно определить по лобовым частям. Если невозможно по оставшейся обмотке определить q и y, то число полюсов можно предварительно найти по отношению наружного диаметра Da статора к его внутреннему диаметру Di:

$2p$	2	4	6	8, 10
Da/Di	1,70 – 1,90	1,55 – 1,65	1,40 – 1,50	1,30 – 1,40

Примечание. В серийных машинах при одних и тех же диаметрах могут быть различные числа полюсов, например, 4 и 6, 6 и 8, 8 и 10.

а затем проверить по величине индукции в спинке статора и в зубцах. Правильность выбора числа полюсов можно проверить также по соотношению чисел пазов ротора и статора (табл. 31).

31. Рекомендуемые числа пазов короткозамкнутых роторов.

$2p$	z_1	z_2 при пазах	
		прямые пазы	скошенные пазы
Электродвигатели для обычных условий работы			
2	18	–	26
	24	[16], 32	(18), (30), 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21,23, (24), 37, 39,40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 34, 50, 52	–
	48	38, 40, 56, 58	59
4	24	[32]	16, [20], 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, [32], 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, [38], (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (39), 40, [44],/57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 42, [48]	47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 161, 103, 105
8	48	34, 62, [64]	35, 61, 63, 65
	72	58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 63, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 138, 140, 142, 144	99, 101, 108, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 82, 98, 106, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163
Электродвигатели для практически бесшумной работы			
4	24	–	16, (12), (30), (32)
	30	–	(18), 20, 22,(24), (36), 38,40
	36	–	(24), 26, 28, 44, 46, (48)
	48	–	(34), 36, 38, 40, 55, 58, 60, 62, 64
6	54	–	42, 44, 64, 66, 68
	72	–	56, 58, 60, 62, 82, 84, 86, 88, 90
8	72	–	58, 86, 88, 90
	96	–	78, 80, 82, 110, 112, 114

Примечания: Числа пазов, заключенные в круглые скобки, дают ухудшенные пусковые характеристики. Числа пазов, заключенные в квадратные скобки, не следует применять для машин, работающих в режиме тормоза.

Расчет обмоточных данных статора трехфазного электродвигателя с всыпной обмоткой.

Статорные обмотки асинхронных электродвигателей выполняются в виде мягких (всыпных) или жестких секций либо протяжкой вручную обмоточного провода в закрытые или полузакрытые пазы. В электродвигателях малой и средней мощности наибольшее распространение получили двухслойные обмотки е мягкими секциями. Ниже рассматривается расчет подобных обмоток.

Полюсное деление (*см.*):

$$\tau = \frac{3{,}14 \times Di}{2p}$$

Площадь полюсного деления ($см^2$):

$$Q\delta = \tau \times l$$

Число последовательно соединенных витков в фазе обмотки при напряжении $U_Ф$ = 127 *в* находят по рис. 12. Если напряжение не равно 127 *в*, то найденное число витков пересчитывают по формуле:

$$w' = \frac{w \times U_Ф}{127}$$

Окончательное число витков уточняется после определения числа проводников в пазе и проверки величины индукции в воздушном зазоре, спинке статора и зубцах (табл. 32).

32. Значение индукций в нормальных асинхронных машинах.

$2p$	$B\delta$, T, при τ, *см*.			Bc, T	Bz***, T
	3 – 6	6 – 11	12 – 30*		
2	–	0,45 – 0,50	0,65 – 0,70	1,2 – 1,7	–
4	0,55 – 0,65	–	0,70 – 0,75	1,0 – 1,5**	1,3 – 1,7
6 и более	–	–	0,71 – 0,77	–	–

* Для закрытых обдуваемых машин значения должны быть уменьшены на 10%.

** Индукция может быть меньше указанных значений при унификации штампов для разных чисел полюсов, например, для $2p$ = 4 и 6; 6 и 8 и т. д.

*** Для трапецеидальных и грушевидных пазов.

Высота спинки статора (*см*.):

$$hc = 0{,}5 \times (Da - Di - 2 \times hп)$$

где $hп$ – глубина паза, *см*.

Число эффективных проводников в пазе:

$$N = \frac{6 \times w' \times a}{z_1}$$

Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z_1}{2pm}$$

Индукция в воздушном зазоре (T):

$$B\delta = \frac{64 \times K_E \times U_Ф}{Коб \times Q\delta \times w'}$$

где K_E – отношение ЭДС к напряжению:

$Q\delta$, $см^3$	15 – 50	50 – 100	100 – 150	150 – 400	Свыше 400
K_E	0,75 – 0,86	0,86 – 0,90	0,90 – 0,93	0,93 – 0,95	0,96 – 0,97

Индукция в спинке статора (T):

$$B_C = \frac{0{,}36 \times B\delta \times \tau}{hc}$$

Пазовое деление (*см*.):

$$\tau = \frac{3{,}14 \times Di}{z_1}$$

Индукция в зубцах (T):

$$B_Z = \frac{B\delta \times \tau}{0{,}93 \times bz}$$

где bz – минимальная толщина зубца, *см*.

Диаметр провода с изоляцией (*мм*.):

$$D = \sqrt{\frac{Kп \times F}{0{,}785 \times n}}$$

Диаметр изолированного провода в асинхронных машинах мощностью 0,6 *кВт*. и выше обычно меньше ширины шлица (прорези) паза на 1,5 – 2 *мм*. При коэффициенте заполнения паза *К*п – 0,4 диаметр изолированного провода можно определить без вычислений по рис. 13, 14. При других значениях *К*п полученную величину надо умножить на коэффициент *К*:

*К*п	0,36	0,37	0,4	0,43	0,46	0,50
К	0,95	0,96	1,0	1,04	1,08	1,12

Пример 11.
Определить диаметр изолированного провода при F = 170 *мм*², n = 82 и *К*п = 0,36.

По рис. 13 находим при *К*п = 0,4 D = 1,02 *мм*., K = 0,95; при *К*п = 0,36, D' = 0,95 × 1,02 = 0,97 *мм*. Диаметр провода без изоляции определяется в зависимости от его марки.
Фазный ток обмотки статора (A):

$$I_Ф = j \times S_{эл} \times n_{эл} \times a$$

где j – плотность тока, *А*/*мм*., (в системе единиц СИ плотность тока выражается в *А*/*м*²; 1 *А*/*м*² = 10⁶ *А*/*мм*²) (табл. 33).

33. Ориентировочные значения плотности тока (*А*/*мм*²) в асинхронных электродвигателях.

Da , *см*.	Защищенных	Закрытых обдуваемых
130 – 300	6,5 – 5,5	6,0 – 4,5
300 – 500	5,5 – 4,5	4,5 – 3,5

34. Энергетический КПД микродвигателей с короткозамкнутым ротором.

2*p*	η cos φ при $S_н$, *ВА*	
	150 – 400	400 – 1000
2	0,4 – 0,6	0,6 – 0,7
4	0,3 – 0,5	0,5 – 0,6

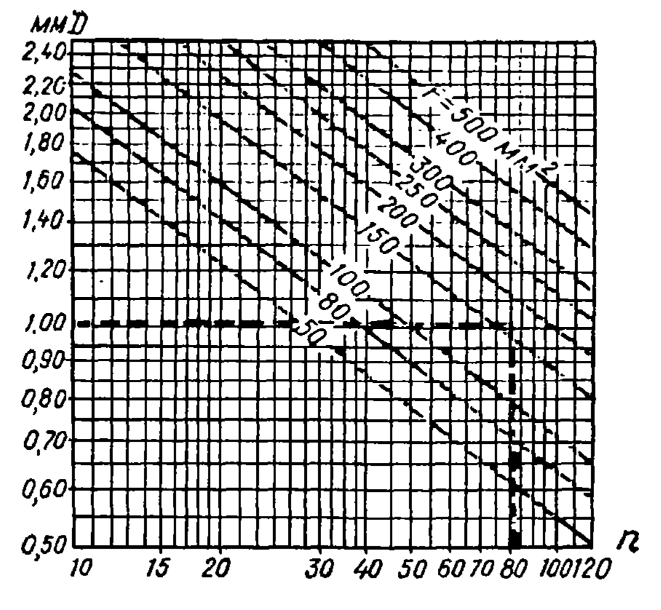


Рис. 13. Определение диаметра изолированного провода D при *К*п = 0,4 и числе проводников в пазе n = 10 – 120.

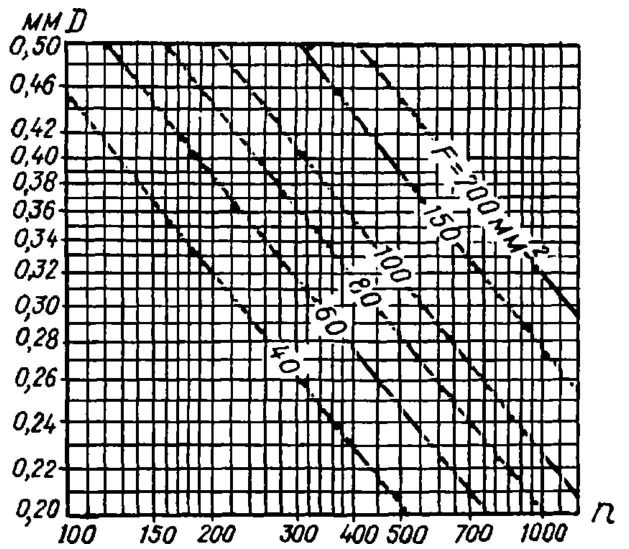


Рис 14. Определение диаметра изолированного провода D при *К*п = 0,4 и числе проводников в пазе n =120 – 1200.

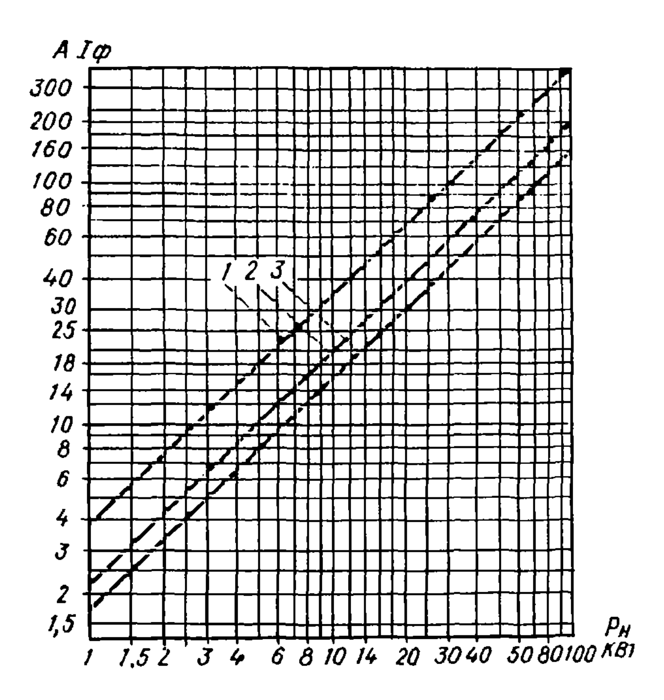


Рис. 15. Зависимость мощности P от тока фазы $I_Ф$ при числе полюсов $2p = 2$ и напряжении $U_Ф$: 1 – 127 *В*, 2 – 220 *В*, 3 – 289 *В* (фазное напряжение при напряжении сети 500 *В* и соединении фаз обмотки звездой).

Номинальная мощность электродвигателей и микродвигателей (до 600 – 1000 *Вт.*): полная мощность (*В*×*А*):

$$S'_H = 3 \times U_{ФН} \times I_{ФН}$$

номинальная мощность на валу:

$$P_{Н} = S_{Н} \times \eta_{Н} \times cos\varphi_{Н}$$

где: $\eta_Н \times \cos\varphi_Н$ – номинальный энергетический КПД (табл. 34).
Номинальная мощность малых и средних электродвигателей (до 100 *кВт.*) при числе полюсов $2p = 2$ определяется по рис. 15; при $2p = 4$, полученное значение надо уменьшить на 6 – 8%, при $2p = 6$, 8 – на 5 – 15 % (больший процент для электродвигателей меньшей мощности).

Пример 12. Определить обмоточные данные статора, исходя из следующих данных: $U_Н$ = 220/380 *В*, $z_1 = 54$, $z_2 = 64$, Da = 29,1 *см.*, Di = 20,6 *см.*, l = 15 *см.*, паз – грушевидный (см. рис. 10). Размеры паза: $h = h$п = 25,9 *мм.*, h_1 = 20,4 *мм.*, b_2 = 9 *мм.*, b_1 = 7 *мм.*, r_2 = 4,5 *мм.*, r_2 = 3,5 *мм.*, bz = 5,5 *мм*. Число полюсов неизвестно. Электродвигатель закрытый обдуваемый.
Число полюсов определяем из отношения:

$$\frac{Da}{Di} = \frac{29{,}1}{20{,}6} = 1{,}41$$

Находим, что значение 1,41 наиболее близко к числу полюсов $2p = 6$. По табл. 31 проверяем, что $z_2 = 64$ допустимо при $z_1 = 54$ и $2p = 6$. Эта машина может быть использована и при $2p = 8$, так как отношение $Da/Di = 1{,}41$ близко к 1,40, которое соответствует $2p = 8$, 10, а в единой серии А2, АО2 применяются при $2p = 8$ числа пазов $z_1 = 54$ и $z_2 = 64$. Однако при этом могут ухудшиться некоторые характеристики электродвигателя. Ведем расчет при $2p = 6$
Полюсное деление:

$$\tau = \frac{3{,}14 \times 20{,}6}{6} = 10{,}8 \quad \text{см.}$$

Площадь полюсного деления:

$$Q_\delta = 10{,}8 \times 15 = 162 \text{ см}^2$$

Число последовательно соединенных витков при напряжении $U_Ф$ = 127, Bw = 76 (по рис. 12).
Число витков при $U_Ф$ = 220 *в*:

$$w' = \frac{76 \times 220}{127} = 132$$

Высота спинки статора:

$$hc = 0{,}5 \times (29{,}1 - 20{,}6 - 2 \times 25{,}9) = 1{,}66 \quad \text{см.}$$

Число эффективных проводников в пазе:

$$N = \frac{6 \times 132 \times 2}{54} = 29{,}3 \approx 30, \text{где } a = 2 \text{ (по табл. 24)}$$

Число последовательных витков при N = 30:

$$w' = \frac{30 \times 54}{6 \times 2} = 135$$

Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{54}{6 \times 3} = 3$$

Шаг обмотки и обмоточный коэффициент определяем исходя из типа обмотки и числа полюсов. Так как диаметр Da > 250 *мм*., выбираем двухслойную обмотку с укороченным шагом y = 7 (1 – 8) (по табл. 25); Kоб = 0,902 (по табл. 28).

Индукция в воздушном зазоре:

$$B\delta = \frac{64 \times 0{,}93 \times 220}{0{,}902 \times 162 \times 135} = 0{,}664 \quad \text{Т}$$

Индукция в спинке статора:

$$B_C = \frac{0{,}36 \times 0{,}664 \times 10{,}8}{1{,}66} = 1{,}55 \quad \text{Т}$$

Пазовое деление:

$$\tau = \frac{3{,}14 \times 20{,}6}{54} = 1{,}2 \quad \text{см.}$$

Индукция в зубцах:

$$B_Z = \frac{0{,}664 \times 1{,}2}{0{,}93 \times 0{,}55} = 1{,}56 \quad \text{Т}$$

Сравнивая величины индукций с допустимыми значениями, находим, что индукция в спинке, статора несколько завышена. Чтобы ее уменьшить увеличиваем число проводников в пазе. Верхнее предельно допустимое значение $B_С$ = 1,5 Т, берем $B_С$ = 1,4 Т для создания некоторого запаса:

$$N' = \frac{N \times B_C}{1{,}4} = \frac{30 \times 1{,}55}{1{,}4} = 33{,}2 \approx 34$$

Площадь паза:

$$F = 1{,}57 \times (3{,}5^2 + 4{,}5^2) + 0{,}5 \times (20{,}4 - 3{,}5) \times (7 + 9) = 186 \quad \text{мм}^2$$

Коэффициент заполнения Kп = 0,4 (по табл. 29), мощность определяем по размерам сердечника и таблицам обмоточных данных. Диаметр провода с изоляцией D = 1,64 *мм*. (по рис. 13) при n = 34 (принимаем $n_{эл}$ = 1). Диаметр провода для марки ПЭТВ без изоляции выбираем по табл. 15: d = 1,56 *мм*. Сечение провода $S_{эл}$ = 1,91 *мм*^{2} (по табл. 18).

Фазный ток обмотки статора:

$$I_{Ф} = 5{,}2 \times 1{,}91 \times 1 \times 2 \approx 19{,}9 \text{ А}$$

где: 5,2 $A/мм^2$ – плотность тока j по табл. 33.
Номинальная мощность по валу:

$$P' = 0{,}9 \times 11 \approx 10 \quad \text{кВт.}$$

где: $P_{Н}$ = 11 *кВт*. (по рис. 15).

Расчет массы и сопротивления всыпной обмотки статора.

Средняя ширина (*см*) катушки двухслойной и однослойной цепной обмоток:

$$\tau_{у} = \frac{3{,}14 \times Di + h п \times y}{z_1}$$

Длина лобовой части (*см.*):
а) двухслойной и однослойной цепной обмоток:

$$l_{Л} = K_{Л} \times \tau_{у} + 2$$

где $K_{Л}$ находят по табл. 35.
б) однослойной концентрической обмотки:

$$l_{Л} = 1{,}4 \times \tau_{y} + (2 \div 5)$$

Большие значения в скобках берутся для более крупных машин.
Вылет лобовой части (см для двухслойной обмотки (от торца сердечника):

$$l_{В} = K_{В} \times \tau_{y} + 2$$

где $K_{В}$ находят по табл. 35.
Средняя длина полувитка (*см.*):

$$l_{ПВ} = l_{Л} + l_1$$

Общая длина провода (*км.*) на обмотку:

$$L = l_{ПА} \times z_1 \times n \times 10^{-5}$$

Масса меди (*кг.*) без изоляции:

$$M_{M} = 7 \times L \times d^2$$

35. Коэффициенты $K_{Л}$ и $K_{В}$ для расчета обмоток.

$2p$	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	$K_{Л}$	$K_{В}$	$K_{Л}$	$K_{В}$
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,40	1,55	0,50
6	1,4	0,50	1,75	0,60
8	1,5	0,50	1,90	0,72

Примечание. Для однослойной цепной обмотки $K_{Л}$ берется на 10 – 15% больше.

Масса провода (*кг.*) с изоляцией:

$$M = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{D}{d}\right)^2\right]$$

Сопротивление фазы трехфазной обмотки (Ом):

$$r = \frac{5{,}85 \times L}{S \times (n_{ЭЛ} \times d)^2}$$

Пример 13. Определить массу и сопротивление обмотки при следующих данных: Di = 14,4 *см*., hп = 2,1 см, l_1 = 14,8 *см*., z_1 = 36, $2p$ = 6, m = 3, n = 32 × 2, d = 1,12 *мм*., a = 1. Обмотка однослойная концентрическая, провод медный ПЭВ–2, D = 1,23 *мм*. Лобовые части не изолированы.

Полюсное деление:

$$\tau = \frac{3{,}14 \times 14{,}4}{6} = 7{,}55 \quad \text{см.}$$

Длина лобовой части:

$$l_{\text{Л}} = 1{,}4 \times 7{,}55 + 4 = 14{,}6 \quad \text{см.}$$

Средняя длина полувитка:

$$l_{\text{ПВ}} = 14{,}6 + 14{,}8 = 29{,}4 \quad \text{см.}$$

Общая длина провода на обмотку:

$$L = 29{,}4 \times 36 \times 32 \times 2 \times 10^{-5} = 0{,}678 \quad \text{км.}$$

Масса меди без изоляции:

$$M_{\text{м}} = 7 \times 0{,}678 \times 1{,}12^2 = 5{,}95 \quad \text{кг.}$$

Масса провода с изоляцией:

$$M = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{1{,}23}{1{,}12}\right)^2\right] \times 5{,}95 = 6{,}1 \text{ кг.}$$

Сопротивление фазы обмотки:

$$r = \frac{5{,}85 \times 0{,}682}{0{,}985 \times (2 \times 1{,}12)^2} = 1 \quad \text{Ом}$$

где S = 0,985 *мм*^{2} (по табл. 18).